

極域電離層の構造 (Review)

松 浦 延 夫*

A Review on Structure of the Polar Ionosphere

Nobuo MATUURA*

Abstract: Characteristic features of the structure of the polar ionosphere in the polar cap, auroral oval zone and trough region, and physical processes affecting the polar ionosphere are summarized. Polar disturbances of the thermosphere having an influence upon the ionosphere are also mentioned.

要旨: 極域電離層を極冠域, 極光オーバル域, トラフ領域に分けて, 各領域での特徴的な電離層構造とそれらに影響を及ぼす物理過程について述べるとともに, 極域電離層じょう乱に密接な関係をもつ熱圏じょう乱についても述べてある。

1. 序

極域電離圏は空間的にも時間的にもきわめて変化に富んでおり, これらの変化は複数の要因によって惹起される。このため, 極域電離圏の構造全体を示す形態的なモデルおよび理論的なモデルについては, いまだ今後の研究に待たねばならない点が多い。

IGY 以後, 主として人工衛星による観測を重ねることによって, 電離圏はもとより磁気圏研究や上層大気研究さらに太陽地球間研究が急速に進歩し, 現在では磁気圏, 電離圏, 上層大気圏に関して歩調を合わせた総合的な研究が可能になってきた。

極域電離圏においては電離源, 熱源としての太陽電磁波輻射の影響の他に, 1) 電離源として寄与する降下粒子の影響, 2) イオン化学反応に寄与する大気の構造および組成の影響, 3) プラズマ輸送に寄与するプラズマおよび大気の力学的な影響が大きく作用しているのが特徴である。

本稿では, これらの要素が極域電離圏の構造にどのように関係しているかという点を中心に述べる。

* 郵政省電波研究所. Radio Research Laboratories, 2-1, Nukui-Kitamachi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184.

2. 磁気圏と電離圏のつながり

磁気圏の観測研究の成果によって、磁気圏の形態については詳細は別としてもその特徴的な性質についてはかなり明らかになってきた。図1は磁気圏の特徴的な性質を示す形態

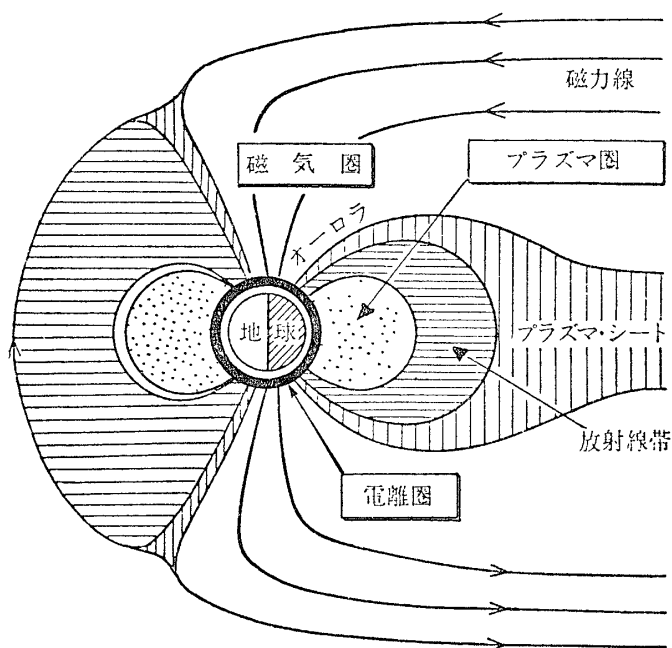


図1 磁気圏モデル

Fig. 1. A model of the earth's magnetosphere.

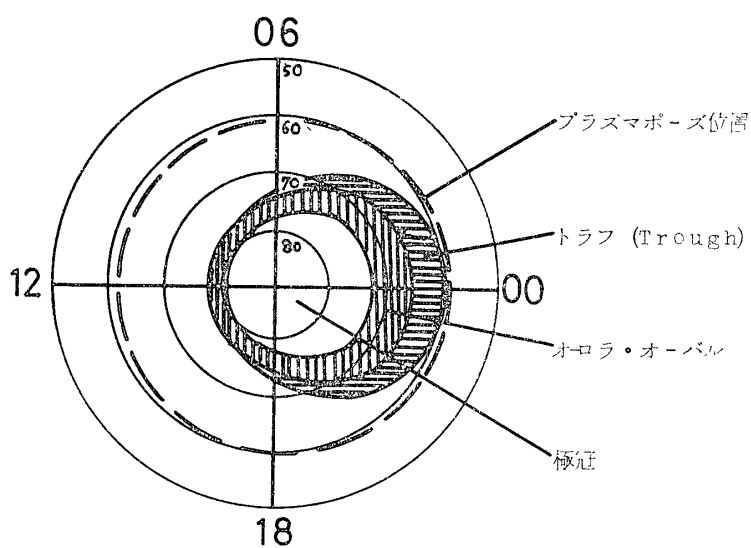


図2 極域電離圏モデル

Fig. 2. A model of the polar ionospheric regions.

モデルである。磁気圏と電離圏は、各磁力線に沿って伝わる粒子や電流・電場等によって関連しているために、外部磁気圏の特徴的な形態は磁力線に沿って極域電離圏に集中して投影されることになる。

図 1 に示されるような磁気圏の形態に対応して極域電離圏は図 2 に示されるようないくつかの特徴的な領域に分けられる。すなわち高緯度側から順に、極冠域、極光帯（オーロラ・オーバル領域）、トラフ（trough）領域、プラズマ圏領域となっている。オーロラ・オーバルの太陽側は磁気圏太陽側のカusp領域に対応しており、反太陽側のオーロラ・オーバルは磁気圏尾部のプラズマシートに対応している。オーロラ・オーバルで囲まれる極冠域は磁気圏尾部の外側に対応している。トラフ領域はプラズマシートとプラズマ圏ではさまれた領域に対応し、主として上側電離圏において低電子密度がみられるトラフ現象は特に夜間において顕著である。プラズマ圏の高緯度側境界つまりプラズマポーズの同定は磁気圏におけるプラズマ密度の急激な変化によって可能であるが、電離圏領域ではプラズマ圏からトラフ領域への移行は一般に緩やかで、トラフ領域の密度が最低になる位置（夜側）とプラズマポーズの位置とがほぼ同一の L 殻上にある。

3. 極域電離圏構造

3.1. 極冠域

太陽フレアに伴って放出される太陽高エネルギー粒子（プロトン、アルファ粒子、電子）が極冠域において下部電離圏の異常電離を起こす現象は、極冠域における短波の異常吸収（PCA）および超長波位相の異常偏移（PCD）等から知られている。太陽高エネルギー粒子の地球上層大気への侵入は地磁気しゃ断効果により極冠域に集中するが、地磁気しゃ断緯度限界は日変化を示し、また地磁気活動度の励起に伴い低緯度側に移動する。

1972 年 8 月に発生した太陽地球間嵐期間において、極めて強い太陽高エネルギー粒子束が人工衛星（1971-089 A）で観測されるとともに、その粒子束の影響を受けたアラスカのチャタニカ IS レーダー基地上空の下部電離圏電子密度分布の観測が行われ、興味ある結果が REAGAN and WATT (1976) により報告されている。人工衛星が IS レーダー基地の近くを通過した 5 回の場合について、粒子観測から求められたイオン生成率 (Q) が図 3a に、IS レーダー観測により得られた下部電離圏の電子密度分布 (N_e) が図 3b に示されている。これら両者の分布から求められた有効再結合係数 ($\psi = Q/N_e^2$) の分布が図 3c に記号で示されており、一方 1969 年 11 月の太陽高エネルギー粒子現象の際にカナダのチ

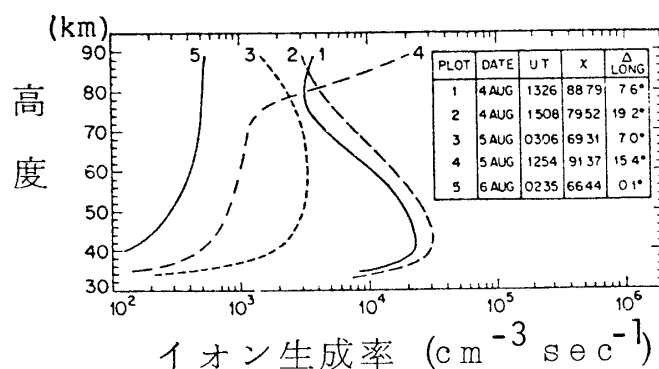


図 3a 高エネルギー粒子観測結果より計算したイオン生成率
 Fig. 3a. Profiles of the ion production rate (Q) derived from the high energy particle fluxes observed by the polar orbiting-satellite 1971-089A.

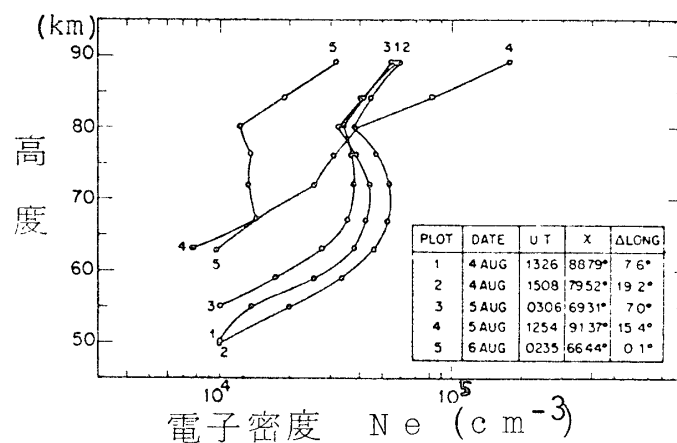


図 3b IS レーダーにより求めた電子密度分布
 Fig. 3b. Profiles of the electron density (N_e) observed by the incoherent scatter radar at Chatanika.

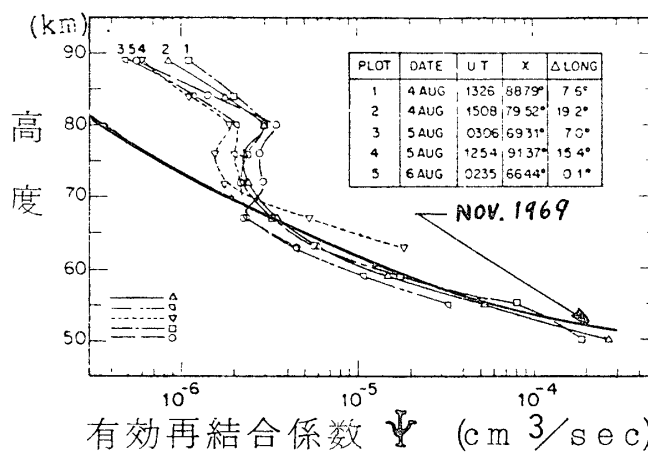


図 3c イオン生成率と電子密度分布より求めた有効再結合係数
 Fig. 3c. Profiles of the effective recombination rate coefficients derived from the data of Q in Fig. 3a and N_e in Fig. 3b, as well as those derived by ULWICK (1972) for November 1969 event.

チャーチルでの観測から得られた冬季日中の有効再結合係数 (ULWICK, 1972) もあわせて図 3c に実線で示されている。両者の間には高度約 70 km 以上で明瞭な差がみられ、高度 80 km 付近での夏季の値は冬季の値に比べて約 1 桁位大きくなっている。このような有効再結合係数の季節変化は、高度 80 km 付近において解離再結合係数 (α_D) が比較的大きい H_3O^+ や $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($\alpha_D \sim 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$) が夏季に卓越し、同係数が比較的小さい NO^+ や O_2^+ ($\alpha_D \sim 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$) が冬季に卓越することによるものと考えられる。

極冠域の上層大気中には数 100 eV という低いエネルギーの電子束が常時流入しているが、時々非常に強い電子束 ($\sim 10^9 \text{ electrons/cm}^2 \text{ s}$) が極冠域の広い範囲にわたって観測されており (FOSTER and BURROWS, 1976), polar squall とも呼ばれている。Polar squall は惑星間空間での粒子観測と対応性が見出せないことから、磁気圏内に源を持つものと考えられ、また極冠域での現象ということで南北両極間の共役性に乏しいことが報告されている。この種の低エネルギー電子の流入は電離圏 F 領域から上側 (トップサイド) 電離圏にかけての電離源、熱源として寄与し、また電子密度不規則分布との関連が強い (DYSON and WINNINGHAM, 1974)。

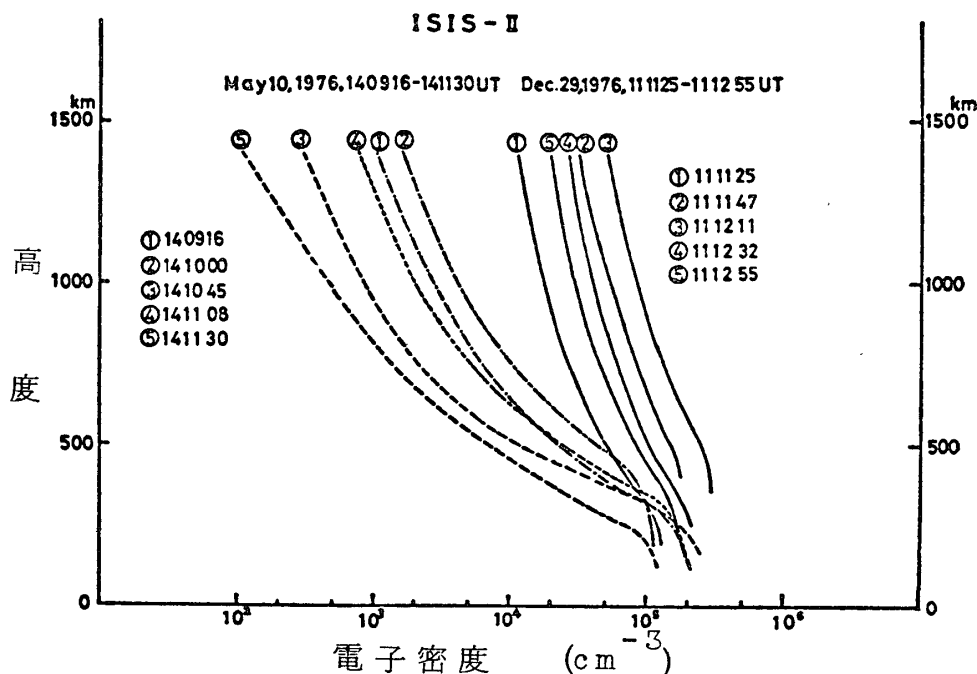


図 4 夏季および冬季の南極域電離圏の電子密度分布

Fig. 4. Electron density profiles for summer and winter polar topside ionosphere over Antarctica derived from ISIS data acquired at Syowa Station.

南極昭和基地で受信した ISIS-2 号衛星のデータによると上側電離圏での電子密度分布は極冠域において著しい季節変化を示している (図 4, 松浦他, 1977)。

3.2. 極光オーバル域

極光オーバル域では, 極光粒子降下および極光電場の存在が特徴的である。前者は極光の励起源, 上層大気のエ離源として作用し, 降下粒子が上層大気へ放出するエネルギーの主要部分は 1-10 keV のプロトンおよび電子が担っている。後者は極域ジェット電流および極域プラズマ対流を励起し, ジェット電流によって発生するジュール熱は上層大気の熱入力として効果的である。

極光域での降下粒子は大なり小なり常時存在しているが, 昼側のカスプ領域での降下粒子エネルギーが太陽風プラズマと同様に約 1 keV 以下であるのに対して, 夜側の極光域での降下粒子エネルギーは約 10 keV 以下となっている。比較的静穏時に ISIS-2 号によって観測された昼側のカスプ領域 (cleft) と夜側の極光域での降下電子束に基づいて求められた電離圏イオン生成率が図 5 (KNUDSEN *et al.*, 1977) に示されている。夜側の極光域

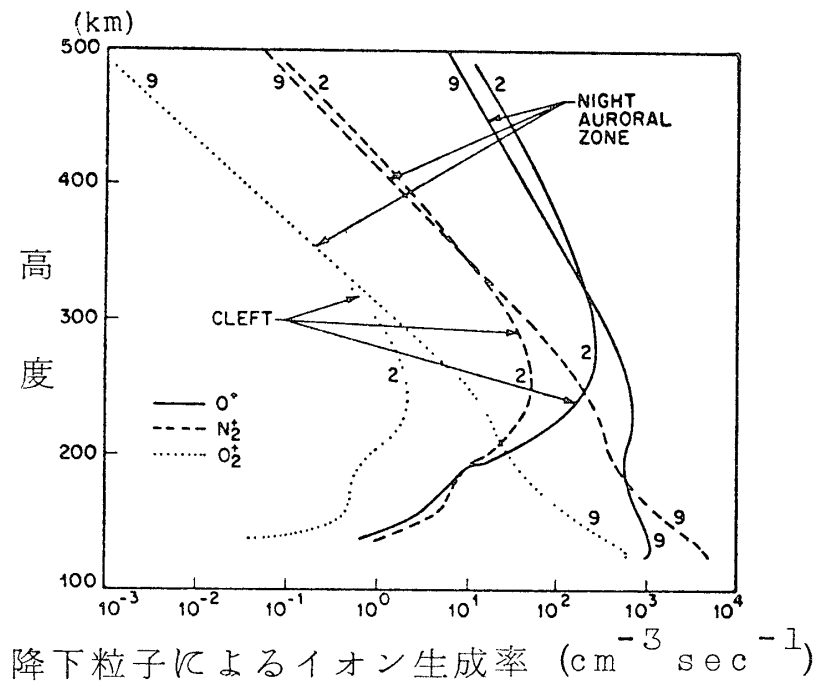


図 5 昼側の cleft および夜側の極光帯における降下電子流より求めたイオン (O^+ , N_2^+ , O_2^+) の生成率

Fig. 5. Profiles of the ion production rates for O^+ , N_2^+ and O_2^+ , respectively at dayside cleft and nightside auroral zone, based on the observed fluxes of precipitating electrons.

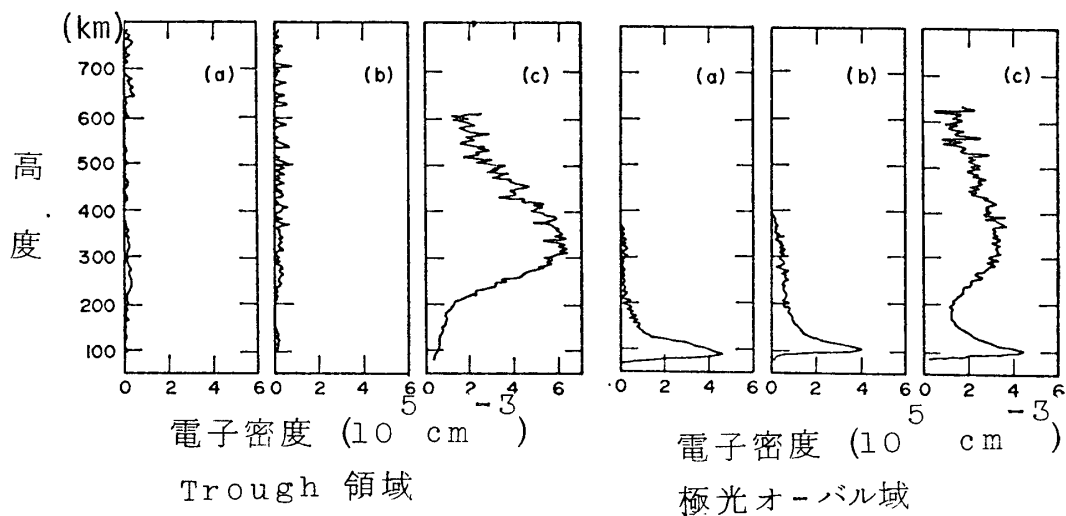


図 6 極光オーバル域およびトラフ (trough) 領域での IS レーダーによる電子密度分布. 図中, (a) は 1974 年 1 月, (b) は 1972 年 10 月, (c) は 1972 年 7 月に得られたデータである.

Fig. 6. Profiles of electron density, respectively at the auroral oval and trough region, observed by the incoherent scatter radar at Chatanika; (a) for January 1974, (b) October 1972 and (c) July 1972.

で E 領域のイオン成生率が高くなっているのは上で述べた粒子エネルギースペクトルの差によるものである.

アラスカのチャタニカ IS レーダー観測によって得られた極光域での電離層電子密度分布の例が図 6 (BANKS and DOUPNIK, 1975) に示されている. E 領域の電子密度が降下粒子の効果によって極端に高くなっている一方, 夏季 (c) を除いて F 領域の電子密度が極端に低い場合が見られる. O^+ イオンが主成分である F 領域での低い電子密度は電離源の不足によるものであるが, 同時に磁力線に沿うプラズマ流出 (polar wind) および O^+ イオンの消滅反応係数の増加によるものと考えられる.

極域での電場は電離圏プラズマのドリフト運動を生ずるが, 磁気圏に存在する朝方から夕方に向かう大規模電場は磁気圏尾部のプラズマシート粒子の地球に向かう運動を促すとともに極冠域から極光域にかけての電離圏プラズマの反太陽方向のプラズマドリフトも促すと考えられる. このドリフトの効果によって昼側の電離圏プラズマが極冠域を越えて夜側の極光域に向けて輸送されることになる. 極域でのプラズマ対流が極域の F 層分布に及ぼす影響を議論した結果が, KNUDSEN *et al.* (1977) によって報告されており, 図 7 に示すような F 層ピーク電子密度分布が得られている.

磁気圏の電場について, 最近沿磁力線電場成分の存在が問題にされている. 極光降下電

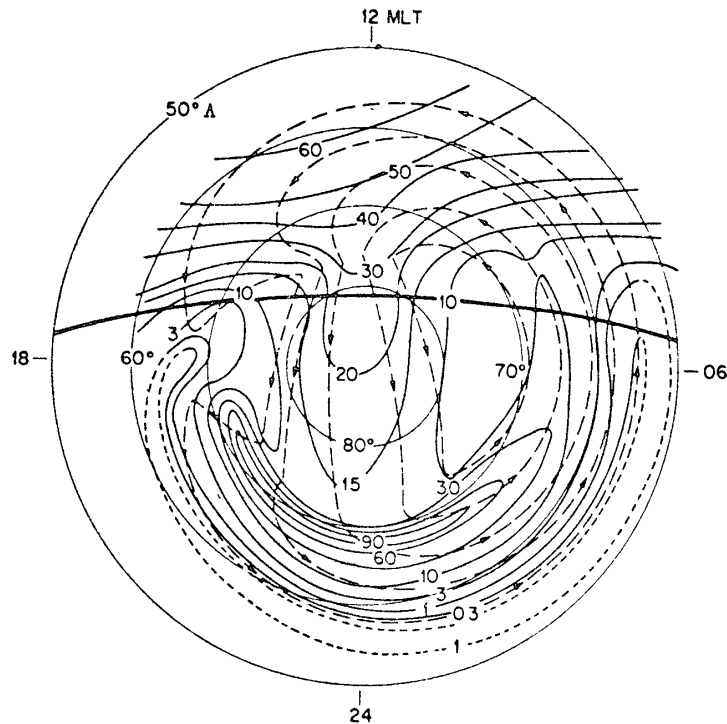


図 7 数値計算により求めた 最大電子密度 ($NmF2$) の等密度曲線 (実線, 単位は 10^4 cm^{-3}). 破線はプラズマ対流の流線, 点線は外挿密度曲線, 太い実線は天頂角 104° の線.

Fig. 7. Contours of $NmF2$ derived from the numerical analysis (continuous curves in unit of 10^4 cm^{-3}), where dotted portions of the contours are derived from extrapolation. The broken curves denote the convection flow lines and the thick line denotes the positions of 104° solar zenith angle.

子スペクトルにみられる“逆 V 字型現象” (FRANK and ACKERSON, 1971) は, 沿磁力線電場成分の存在を示すものと考えられているが, その他最近磁気圏尾部で, 地球から外側に向かう O^+ イオン流が FRANK *et al.* (1977) によって検出されている. 磁気圏尾部で観測された O^+ イオンは極域電離圏から流出してきたものと考えられ, O^+ イオンのエネルギーが 1-5 keV 程度であることから 沿磁力線電場による 加速の効果が作用しているものと思われる.

3.3. トラフ領域

磁気圏での熱的プラズマ分布は, ある L 殻を境にして, 熱的プラズマが卓越する内側のプラズマ圏から, 密度が外側で急激に減少する性質を持つことが知られており, その境界をプラズマポーズと呼んでいる. プラズマポーズと極光オーバルの低緯度側境界 (または粒子捕捉の高緯度限界) とではさまれた L 値範囲の電離圏では, 夜間において電子密

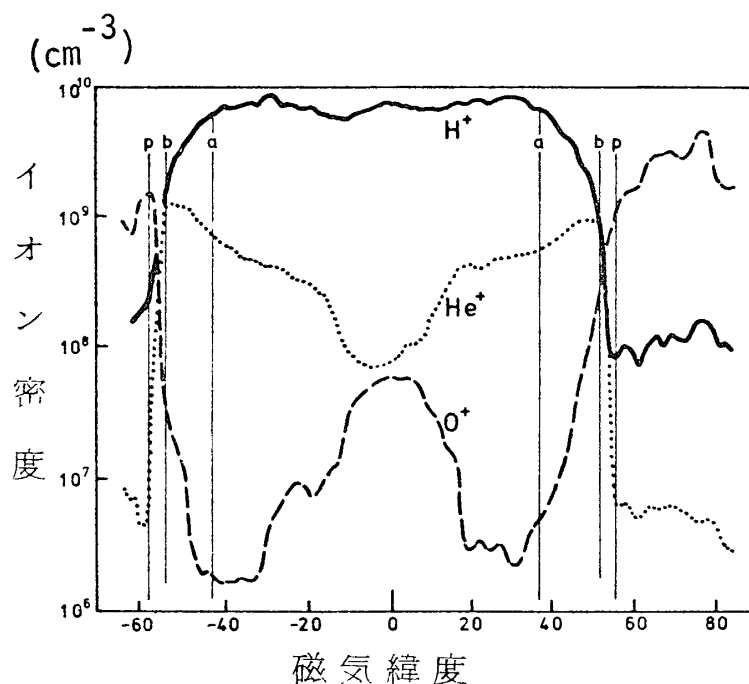


図 8 OGO 4 により観測されたイオン密度の緯度分布. 図中 a はプラズマポーズ効果の低緯度限界, b は O^+ と H^+ の遷移高度の急変の限界, p はプラズマポーズ緯度を示す.

Fig. 8. Latitudinal distributions of ion concentrations derived from OGO 4 observation. The position (a) corresponds to the lower latitude boundary of the plasma pause effects, (b) the rapid change of O^+-H^+ transition level, and (p) the plasma pause.

度分布に谷間がみられることからトラフ領域と呼ばれている. プラズマポーズの位置およびそれに対応するトラフ領域の位置は地磁気活動度に応じて変動し, 静穏時で $L \sim 6$, 激しいじょう乱時には $L \sim 2$ あるいはそれ以下にも達することがある.

磁気圏でのプラズマポーズに対応する電離圏現象としては, 上側電離圏において低緯度側から高緯度側に向かって電子密度および H^+ イオンが減少し, 一方 O^+ イオン密度が増加すること (図 8, TITHERIDGE, 1976), 電離圏プラズマ温度の上昇がみられること (TITHERIDGE, 1976), 地磁気嵐の際に SAR (stable auroral red) アークが見られることがあげられる.

上側電離圏での電子密度および H^+ イオンの減少は, プラズマポーズの成因と同様に磁気圏プラズマの流出によるものであり, プラズマ温度の上昇およびその極端な場合における SAR アークの発生は, 磁気圏環電流粒子とプラズマ圏プラズマとの波動粒子相互作用によるプラズマ加熱と電離圏への熱伝導によるものと考えられている.

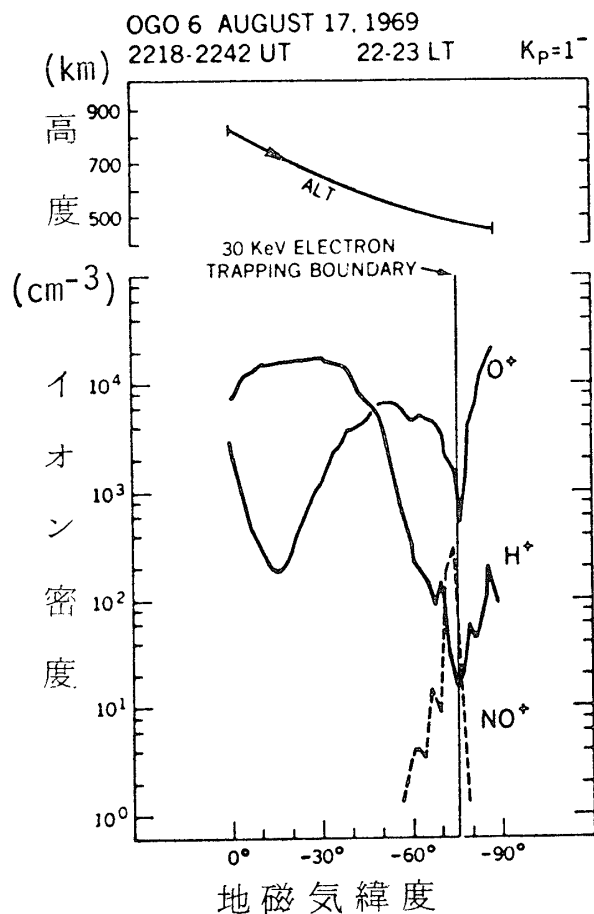


図 9 OGO 6 により観測された高緯度トラフ

Fig. 9. Latitudinal distributions of ion concentrations derived from OGO 6, where the existence of "high latitude trough" is shown.

上で述べた主トラフ領域よりも高緯度、つまり極光オーバルの高緯度境界付近で高緯度トラフ領域が存在することが、最近 GREBOWSKY *et al.* (1976) によって指摘されている。高緯度トラフの特徴は図 9 に示されるように、イオン組成変化が主トラフ領域 (図 8) の場合と異なり、 O^+ 、 H^+ 共に密度が減少し、分子イオンである NO^+ 密度の増加がみられる点である。

3.4. 電子密度不規則分布

極域電離圏全般に特徴的な現象として、電子密度の不規則分布がある。この現象は電波サウンディングのエコー乱れ (spread echo)、VHF 電波シンチレーション、IS レーダーのエコー乱れ等電波によって観測される他、飛しょう体によるプラズマ密度の直接測定によっても観測されている。

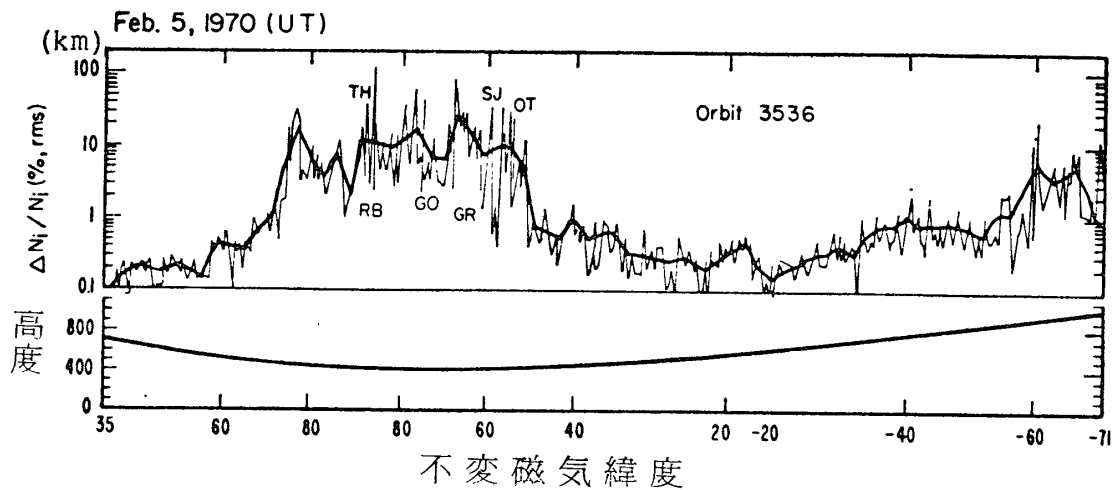


図 10 OGO 6 のプラズマプローブにより観測されたイオン密度ゆらぎ $\Delta N_i/N_i$ の緯度分布.

Fig. 10. Fluctuations in ion density observed by OGO 6 plasma probe.

電子密度不規則分布の代表的な現象である spread F は広い緯度範囲で観測されるが、特に極域において強度も強くまた頻度もきわめて高い。極域に次いで磁気赤道も、この現象の多発地域となっている。

電子密度不規則分布の発生機構は必ずしも明確ではないが、 E 領域については電場によるプラズマ運動 (two stream instability または drift instability) が有力な発生機構であるが、 F 領域および上側電離圏については、電場効果 (磁気赤道)、プラズマ加熱 (UTLAUT and VIOLETTE, 1972; CLARK and RAITT, 1975), あるいは降下粒子効果 (DYSON and WINNINGHAM, 1974) が考えられる。

OGO-6 によって観測された衛星位置での電子密度ゆらぎ、すなわち $\Delta N/N$ (%) の緯度分布例が図 10 に示されている (WRIGHT *et al.*, 1977). 観測は retarding potential analyzer を用いてイオン密度を測定したもので、図 10 の細線は 4.7 秒つまり距離約 40 km 毎に得られた値を示しており、太線は 5 個の値の移動平均を示している。密度ゆらぎは極域で著しく大きくなっており 10% 程度に達している。

極域の電子密度ゆらぎの激しい領域の低緯度側境界は、昼側においては 300 eV 以下の電子降下領域の低緯度側境界と一致しており (DYSON and WINNINGHAM, 1974), 夜側ではプラズマポーズに対応する位置よりやや低緯度側にありプラズマ温度が高くなっている位置に対応している (CLARK and RAITT, 1975).

4. 極域じょう乱

電離圏に関する極域じょう乱は電離層嵐として古くから知られているが、電離圏に關係の深い熱圏大氣に関する極域じょう乱を示す観測結果が得られるようになってきた。

極域じょう乱に伴う降下粒子あるいはジュール加熱によって熱圏大氣温度が上昇することは、すでに人工衛星に及ぼす大氣抵抗の観測から知られているが、最近では OGO-6 あるいは AE-C などに搭載された中性大氣の質量分析計による観測から、空間的な分解能が著しく改善されるようになった。図 11 (TAEUSH, 1977) は OGO-6 で観測された N_2 密度を高度 450 km の値に変換し、さらに $K_P \geq 3_+$ の場合に得られた値と $K_P \leq 3$ の場合に得られた値との比を示したもので、極域じょう乱による熱圏大氣の加熱の度合を示すものと考えられる。熱圏大氣の加熱エネルギー入力は、大体極光オーバルに沿って行われているが、夜側において特に顕著である。

極域大氣の加熱によって熱圏大氣の運動が生ずることになるが、熱圏大氣の大規模な循

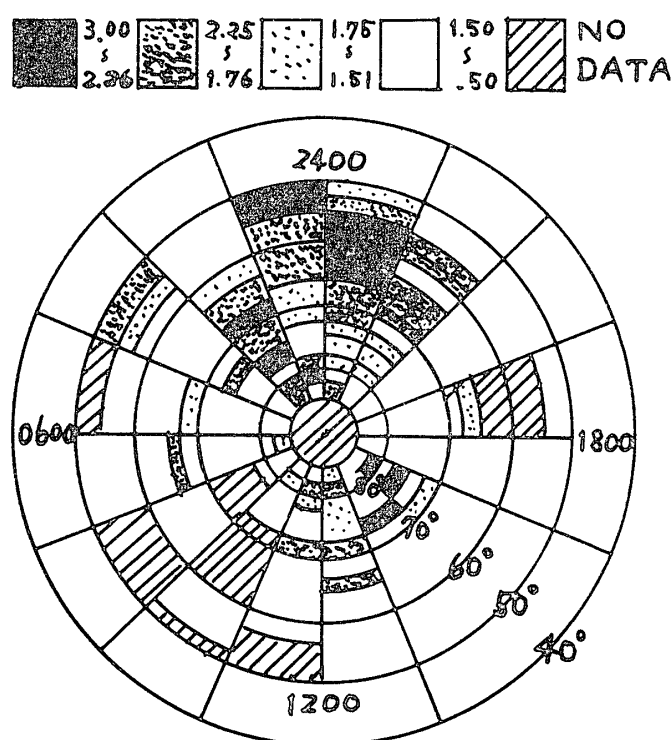


図 11 OGO 6 により観測された窒素分子 (N_2) 密度の比 ($K_P \leq 3$ の平均密度に対する $K_P \geq 3_+$ の時の密度比)。

Fig. 11. Polar plot of the ratio of N_2 densities for $K_P \geq 3_+$ to those for $K_P \leq 3$.

環は熱圏大気組成を変化させる。熱源に対応する極域では大気の上昇運動が生じ、He, O など比較的質量の小さい成分の減少となり低緯度ではこの逆の変化が予想される。AE-C 等による大気組成の観測結果は大気の大循環の存在を示唆している (MAYR and HEDIN, 1977)。このような熱圏大気組成の変化は電離圏構造の変化を生ずる。

極域熱圏大気の急激な加熱によって大気重力波が発生し、低緯度領域に伝搬することも考えられ、力学的な相互作用によって電離圏構造を変化させ得る。

5. 結 び

極域電離圏構造は磁気圏および熱圏との関連で複雑な形態をもっており、全容を述べることができなかったのは残念であるが、今後の研究進歩に期待したい。

文 献

- BANKS, P. M. and DOUPNIK, J. R. (1975): A review of auroral zone electrodynamics deduced from incoherent scatter radar observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **37**, 951-972.
- CLARK, D. H. and RAITT, W. J. (1975): Characteristics of the high-latitude ionospheric irregularity boundary, as monitored by the total ion current probe on ESRO-4. *Planet. Space Sci.*, **23**, 1643-1647.
- DYSON, P. L. and WINNINGHAM, J. D. (1974): Top side ionospheric spread *F* and particle precipitation in the day side magnetospheric clefts. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5219-5230.
- FOSTER, J. C. and BURROWS, J. R. (1976): Electron fluxes over the polar cap 1. Intense keV fluxes during poststorm quieting. *J. Geophys. Res.*, **81**, 6016-6028.
- FRANK, L. A. and ACKERSON, K. L. (1971): Observations of charged particle precipitation into the auroral zone. *J. Geophys. Res.*, **76**, 3612-3643.
- FRANK, L. A., ACKERSON, K. L. and YEAGER, D. H. (1977): Observations of atomic oxygen (O^+) in the earth's magnetotail. *J. Geophys. Res.*, **82**, 129-134.
- GREBOWSKY, J. M., CHEN, A. J. and TAYLOR, H. A., Jr. (1976): High-latitude troughs and the polar cap boundary. *J. Geophys. Res.*, **81**, 690-694.
- KNUDSEN, W. C., BANKS, P. M., WINNINGHAM, J. D. and KLUMPAR, D. M. (1977): Numerical model of the convecting F_2 ionosphere at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4784-4792.
- 松浦延夫・緒方隆信・西崎 良 (1977): 南極域における ISIS トップサイド・サウンディング (速報). IMS シンポジウム 1977 年, 東京大学宇宙航空研究所, 122-127.
- MAYR, H. G. and HEDIN, A. E. (1977): Significance of large-scale circulation in magnetic storm characteristics with application to AE-C neutral composition data. *J. Geophys. Res.*, **82**, 1227-1234.
- REAGAN, J. B. and WATT, T. M. (1976): Simultaneous satellite and radar studies of the *D* region ionosphere during the intense solar particle events of August 1972. *J. Geophys. Res.*, **81**, 4579-4596.
- TAEUSH, D. R. (1977): Structure of electrodynamic and particle heating in the disturbed polar thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **82**, 455-460.

- TITHERIDGE, J. E. (1976): Plasmopause effects in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **81**, 3227–3233.
- ULWICK, J. C. (1972): Effective recombination coefficients and lumped parameters in the *D*-region during solar particle events. *Proceedings of COSPAR Symposium on Solar Particle Event of November 1969*. Bedford, Air Force Cambridge Research Laboratories, 571 p (AFCRL-72-0474).
- UTLAUT, W. F. and VIOLETTE, E. J. (1972): Further ionosonde observations of ionospheric modification by a high-powered HF transmitter. *J. Geophys. Res.*, **77**, 6804–6818.
- WRIGHT, J. W., McCLURE, J. P. and HANSON, W. B. (1977): Comparisons of ionogram and Ogo 6 satellite observations of small scale *F* region inhomogeneities. *J. Geophys. Res.*, **82**, 548–554.

(1978年6月10日受理)